

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 19920121152735

UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

基于韦森堡效应的电纺直写射流约束与定位沉积实验研究

Restriction and Position Deposition of Electrohydrodynamic
Direct-Writing Jet Beased on Weissenberg Effect

王 伟

指导教师姓名: 郑 高 峰 副教授

孙 道 恒 教 授

专 业 名 称: 机械制造及其自动化

论文提交日期: 2015 年 04 月

论文答辩时间: 2015 年 05 月

学位授予日期: 2015 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2015 年 04 月

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

摘 要

电纺直写技术以其独特的原理性优势被认为是最具发展前景的微纳制造技术之一，提高射流的稳定性和有机微纳结构的沉积精度是将电纺直写技术应用到各领域的关键技术。本文利用溶液在微管道内的韦森堡效应实现对喷头供液，并围绕该供液方式对电纺直写泰勒锥、射流的稳定性和沉积行为展开研究，促进电纺直写的发展。

本文设计一种基于韦森堡效应的旋转针芯喷头，分析旋转针芯喷头的供液原理，并利用工业相机观测旋转供液方式的速度稳定性，考察针芯转动速度、液柱高度等工艺参数，以及微管道长度、针芯伸出长度、针芯柱径等结构参数对供液速度、液体锥形状的影响规律。通过调控参数，实现溶液的输送速度在 $100\mu\text{l/hr}$ 范围内的调控。

利用仿真软件分析旋转针芯喷头内溶液的剪切变稀现象，得出旋转针芯喷头内的溶液剪切变稀程度比空心喷头大，其中周向流动引起的剪切变稀可降低至原粘度的 5% 以下；旋转针芯喷头输送溶液时产生周向、轴向、径向的剪切应力，克服了巴勃斯效应，避免喷头出口处液滴直径的增大；利用 ANSYS 软件仿真、分析喷头与收集板之间的电场，探究针芯对电场的优化作用。基于以上优势，韦森堡效应对射流的形成、喷射具有显著的影响，其启动电压和维持电压最低可降至空心喷头的 55%；射流在具有凸起结构的基片上喷射时，射流抗干扰程度较空心针头大，说明旋转针芯喷头可以约束泰勒锥和射流，从而增强纺丝射流的稳定性。

研究基于韦森堡效应的电纺直写的沉积行为，对比分析旋转供液方式的电纺直写沉积纤维的优势，发现旋转针芯喷头直写的射流可以克服空心喷头电纺过程中易产生的射流分叉、纤维沉积精度不高等问题，沉积纤维可利用率可以达到 90% 以上；探索交流电压作用下旋转针芯喷头喷射出的液滴结构优势，改变针芯转速、脉冲频率可以有效改变液滴喷印的直径和频率，当电压幅值在 $2.2\text{kV}\sim 2.7\text{kV}$ 范围内变化时液滴喷印的直径和频率变化不大。

本文提出将旋转供液方式应用到电纺直写，论证、分析旋转供液在电纺直写

技术中的优势,通过实验观察电纺直写泰勒锥、射流的稳定性,并观测沉积结构,为后续研究提供了数据支持。

关键词: 韦森堡效应; 电纺直写; 泰勒锥; 射流稳定性; 沉积控制

厦门大学博硕士论文摘要库

Abstract

Electrospinning direct writing technology is one of the most promising technology in micro nano manufacturing. To improve the stability and accuracy of jet deposition is the key to electrospinning direct writing of industrial application. The Weissenberg Effect is introduced into the Electrospinning direct writing technology, to promote the stability of Taylor cone and jet, precise deposition.

The principle of Weissenberg Effect in the Electrospinning direct writing nozzle is analysed. Based on the nozzle, some parameters are investigated, such as the rotation speed of the needle, the liquid column height, the microtubule length, the extended length of the needle, the diameter of the needle, which influence the feed rate and shape of taylor cone.

Based on ANSYS software, the rule of the electric field of this new nozzle is studied. The new nozzle can focus the electric field around the spinneret and extrode, which makes the solution more prone to spray. The result also proves that the shape of the solution on the tip of the revolving needle is cone due to the shear thinning phenomenon. Moreover, COMSOL MULTIPHYSICS software is used to analyse the change of viscosity of solution caused by the Weissenberg Effect in the micro pipeline. Based on the above points, the new nozzle can restrain the whipping and spiral of charged jet, which improves the deposition precision of jet.

Electrospinning direct writing based on the Weissenberg effect shows a more stable Taylor cone and jet than the hollow nozzle does. By observing the deposition of micro nano structure, it verifies the advantages of the proposed method, which provides theory and experimental support for further study.

Keywords: the Weissenberg Effect; Electrohydrodynamic Direct-Writing; Taylor cone; Jet Ejection;.

厦门大学博硕士论文摘要库

目 录

第一章 绪论	1
1.1 电液耦合喷印技术.....	1
1.1.1 电液耦合喷印原理.....	1
1.1.2 电纺直写技术.....	5
1.2 电纺直写喷头.....	7
1.2.1 针尖结构直写喷头.....	7
1.2.2 空心针管直写喷头.....	8
1.2.3 带针芯直写喷头.....	10
1.3 韦森堡效应.....	11
1.4 研究目标及内容.....	12
1.4.1 课题提出.....	12
1.4.2 研究目标与内容.....	13
第二章 旋转供液电纺直写实验设备与供液速度调控规律.....	15
2.1 旋转供液电纺直写实验系统.....	15
2.1.1 旋转供液电纺直写系统组成.....	15
2.1.2 旋转针芯的电纺直写喷头.....	17
2.1.3 主要实验仪器设备.....	18
2.1.4 电纺直写实验材料.....	19
2.2 旋转供液速度的测量方法.....	19
2.3 旋转供液的影响因素.....	21
2.3.1 旋转供液速度稳定性的分析.....	22
2.3.2 旋转工艺参数对供液速度的影响.....	25
2.3.3 喷头结构参数对供液速度的影响.....	27
2.4 本章小结.....	32
第三章 旋转供液电纺直写射流行为研究	33
3.1 旋转供液剪切变稀.....	33
3.2 旋转供液的溶液输送.....	38
3.3 旋转供液喷头空间电场.....	40
3.4 旋转供液电纺直写射流.....	44
3.4.1 泰勒锥及射流喷射理论.....	44
3.4.2 射流启动电压和维持电压.....	45

3.4.3 针芯约束下的射流.....	47
3.5 本章小结.....	52
第四章 旋转供液电纺直写微纳结构.....	55
4.1 纤维沉积行为.....	55
4.1.1 旋转供液电纺直写微纳结构形貌.....	55
4.1.2 旋转供液电纺直写微纳结构直径.....	58
4.2 液滴沉积行为.....	60
4.2.1 电压频率对液滴喷印的影响.....	60
4.2.2 脉冲占空比对液滴喷印的影响.....	61
4.2.3 电压幅值对液滴喷印的影响.....	62
4.2.4 针芯转速对液滴喷印的影响.....	63
4.3 本章小结.....	64
第五章 总结与展望	65
5.1 总结.....	65
5.2 展望.....	66
参考文献	67
硕士期间科研成果	77
致谢.....	75

Contents

1 Introduction.....	1
1.1 Electrohydrodynamic Printing Technology	1
1.1.1 The principle of Electrohydrodynamic Printing Technology	1
1.1.2 Electrospinning Direct Writing Technology	5
1.2 Electrospinning Direct Writing Nozzle.....	7
1.2.1 Tip Structure Nozzle	7
1.2.2 Hollow Structure Nozzle.....	8
1.2.3 Needle Core Nozzle	10
1.3 The Weissenberg Effect	11
1.4 Tarks and Works.....	12
1.4.1 Issues Rasied	12
1.4.2 Objectives and Research Works.....	13
2 Experimental Equipment and Regulation of Supply Liquid Velocity	
.....	15
2.1 Experiment System	15
2.1.1 System Composition	15
2.1.2 Nozzle Structure.....	17
2.1.3 Experiment Equipments.....	18
2.1.4 Experimental Materials	19
2.2 Measurement Method for Liquid Velocity.....	19
2.3 Influence Factors of Rotary Feed Liquid	21
2.3.1 Stability Analysis	22
2.3.2 Process Parameters on the Speed of the Feed	25
2.3.3 Structural Parameters on the Speed of the Feed	27
2.4 Summary	32
3 Direct-Writing Jet Injection Experiment	33
3.1 Shear Thinning	33
3.2 Solution Shape	38
3.3 The Distribution of Electric Field in Space	40
3.4 Direct-Writing Jet	44

3.4.1 Theory of Taylor Cone and Jet.....	44
3.4.2 Onset Voltage and Sustaining Voltage	45
3.4.3 Jet Stability.....	47
3.5 Summary.....	52
4 Direct-Writing Fiber deposition	55
4.1 Micro-nano Fiber	55
4.1.1 The Microstructure of Fiber Deposition	55
4.1.2 Fibre Diameter	58
4.2 Micro-nano drops.....	60
4.2.1 Influence of Voltage Frequency to Drops	63
4.2.2 Influence of Duty Cycle to Drops	62
4.2.3 Influence of Voltage to Drops	60
4.2.4 Influence of Needle Rotation Rate to Drops.....	61
4.3 Summary.....	63
5 Conclusions and Future Work.....	65
5.1 Conclusions.....	65
5.2 Future Work	66
Reference.....	67
Publications and Patents	77
Acknowledgements	75

第一章 绪论

有机微纳结构以其独特的光学^[1]、电学^[2]和生物学^[3]特性，在柔性电子^[4-5]、微纳器件^[6]、有机电子^[7]和生物医药^[8]等领域具有巨大的应用前景。喷印技术在制备微结构过程中无需曝光、掩膜，且材料、工艺兼容性好，满足了有机微纳系统制造成本低、卷对卷制造的发展需求，成为有机微纳系统最具有发展潜力的制造技术^[9]，现有喷印技术中的内压力式喷印技术，如热气泡式^[10]、压电式^[11]、静电式^[12]等传统喷印技术，喷印液滴直径、结构线宽大^[13]，且只能喷印低粘度溶液，无法满足有机微纳系统集成制造的发展需求^[14]。

电液耦合喷印是一种新型的外拉力式喷印技术，在外拉力作用下喷射射流直径小于喷嘴内径，溶液粘度范围广、材料兼容性好、喷印尺寸跨度大，在有机微纳系统制造中显示出了巨大的应用潜力^[15]。在现有电液耦合喷印技术基础上，提高射流稳定性和定位精度，增强射流喷射调控技术，已经成为电液耦合喷印产业化应用研究的关键。

1.1 电液耦合喷印技术

电液耦合喷印技术利用静电力拉伸溶液，溶液变形并产生射流喷射，以离散液滴或连续纤维的形式沉积在收集板上^[16]。喷印微纳结构直径范围为 1nm~10 μ m，满足不同有机微纳结构的喷印需求。

1.1.1 电液耦合喷印原理

电液耦合喷印是利用高压静电场力诱导溶液产生波动，产生射流喷射，射流向基片进行连续微纳结构或离散液滴结构的喷印^[17]，其射流的形成过程如图 1-1 所示。19 世纪，Rayleigh^[18]发现液滴带有强电场力时会从细孔中喷射出射流，并提出使液滴发生喷射的电量阈值公式，这种带电液滴发生喷射的现象被称为“雷诺不稳定现象”。1914 年，Zeleny^[19, 20]指出施加于滴液的电场强度超过临界值，液滴会发生形变，液滴出现锥尖后喷射，同时还研究了射流喷射的分裂模式。1969 年，Taylor^[21-24]通过观察射流喷射后的液滴形状，描述液体的锥形结构与射流形

态，并提出射流产生的最低电压的计算公式，这种带电液滴产生射流后所呈现的液滴形状就称为“泰勒锥”。Jaworek^[25, 26]在先前研究人员的研究基础上提出电液耦合喷印的喷射模式：液滴、纺锤体和射流模式，Hartman^[27-29]通过分析电液耦合喷印的不稳定现象，将不稳定的射流模式分为三种：射流分裂为液滴、射流鞭动以及射流分叉。随着有机微纳结构制备和应用的发展，对电液耦合喷印技术的研究也越来越深入，其中静电纺丝和静电雾化是电液耦合喷印两种典型技术。

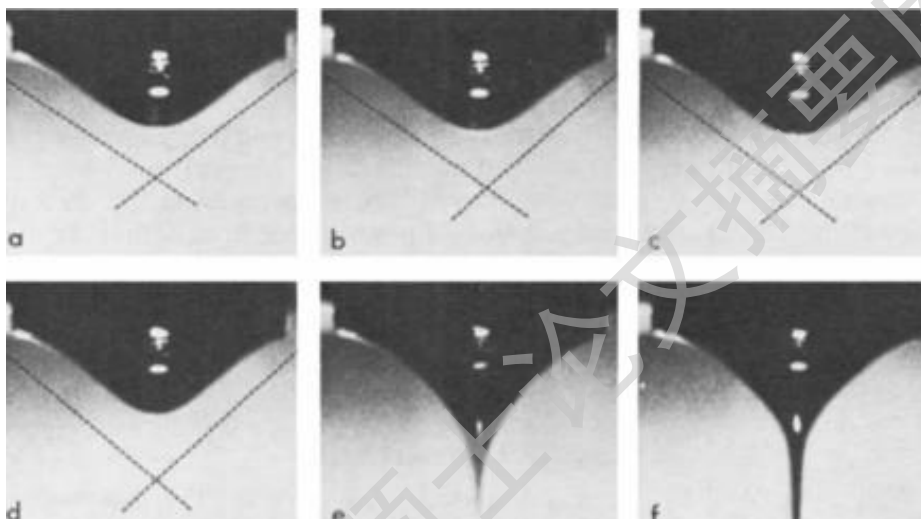


图 1-1 电液耦合喷印射流的形成^[17]

(1) 静电纺丝

静电纺丝是一种可以进行连续喷印微纳结构的电液耦合典型技术。1934~1944，Formhals^[30-36]提出采用静电力拉伸、制备纤维的方法。静电纺丝设备简单，如图 1-2 所示，利用高压电源、喷头和收集板等设备即可在实验室条件下制备微纳结构：溶液输送装置将纺丝溶液输送至喷头末端，喷头末端形成悬挂液滴。处于高压静电场的液滴会发生形变，形成泰勒锥。当电场力增大至克服溶液表面张力时，射流从泰勒锥锥尖喷射出射流。在电场力作用下，携带电荷的射流向收集板加速运动，经电场力的拉伸作用、溶剂挥发、射流电荷的互相排斥，射流逐渐减小，最后以纤维形式沉积于收集板^[37, 38]。

静电纺丝过程中，从泰勒锥喷射出射流到射流沉积于收集板的过程中，射流将会经历三个阶段^[39-41]：泰勒锥锥尖产生射流、射流直线稳定运动和射流不稳定鞭动运动，如图 1-3 所示。Reneker^[41]课题组对射流的运动行为进行理论研究和实验观测，指出喷射出的射流将会以直线方式运动一段时间后，由于受到电荷排

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.